



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA APERTURA DE LAS VENTANAS Y LA VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN EN LA AERODINÁMICA DE UN VEHÍCULO DE TURISMO

STUDY OF INFLUENCE OF THE OPENING OF THE WINDOWS AND THE SPEED OF CIRCULATION IN THE AERODYNAMICS OF A VEHICLE TOURISM

Yasmany Aguilar^{1,*}, Ismael Caldas², Andrés Rivera¹, Erik Tapia²

Resumen

En este artículo se presenta el estudio aerodinámico de un vehículo de turismo, tomando como muestra el Chevrolet Forsa 1.3, en el que se realizan pruebas de carretera para obtener valores de los coeficientes aerodinámico (C_x) y de fricción (Fr) en diferentes posiciones de apertura de las ventanas y diversas velocidades del vehículo. Para corroborar la información obtenida en las pruebas en las cuales se basa para el cálculo del C_x , se realiza un modelado del vehículo a utilizar en SolidWorks®, con la intención de efectuar una simulación que permita obtener los valores del C_x cuando las ventanas se encuentran en diversas posiciones y a una velocidad específica. Además, se realiza un diseño experimental en Minitab®, el cual permite conocer la incidencia que tiene cierta variable sea de apertura de las ventanas o velocidad del vehículo sobre el C_x y Fr . Los resultados obtenidos demuestran que el valor de C_x aumenta conforme se abren las ventanas del vehículo cuando se viaja a velocidades superiores a los 90 km/h, lo que significa mayor resistencia al avance y por ende un incremento en el consumo de combustible y emisiones contaminantes.

Palabras clave: Coeficiente aerodinámico, consumo de combustible, emisiones contaminantes, diseño experimental.

Abstract

This article presents the aerodynamic study of a tourism vehicle, taking as a case study the Chevrolet Forsa 1.3, in which road tests are performed to obtain values of the aerodynamic coefficient (C_x) and the coefficient of friction (Fr) in different opening positions of the windows and various Vehicle speeds.

In order to corroborate the information obtained during the tests to calculate the C_x , a modeling of the vehicle to be used in SolidWorks® is carried out, with the intention of performing a simulation that allows to obtain the values of the C_x when the windows are in different positions and at a specific speed. In addition an experimental design is realized in Minitab®, which allows to know the incidence that has the variables of either opening the windows or speed of the vehicle on the C_x and Fr . The results show that the value of C_x increases as the windows of the vehicle are opened when traveling at speeds in excess of 90 km/h, which means more resistance to progress and therefore an increase in fuel consumption and pollutant emissions.

Keywords: Aerodynamic coefficient, fuel consumption, pollutant emissions, experimental design.

^{1,*}Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte (GIIT), Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador. Autor para correspondencia ✉: aaguilar@ups.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0001-8572-7580>, <http://orcid.org/0000-0002-9249-7805>.

²Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador.
<http://orcid.org/0000-0001-8766-1773>, <http://orcid.org/0000-0001-7838-2502>

Recibido: 07-01-2017, aprobado tras revisión: 10-04-2017

Forma sugerida de citación: Aguilar, Y.; Caldas, I.; Rivera, A.; Tapia, E. (2017). «Estudio de la influencia de la apertura de las ventanas y la velocidad de circulación en la aerodinámica de un vehículo de turismo». INGENIUS. N.º 18, (julio-diciembre). pp. 7-13. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

La resistencia aerodinámica influye en diversos aspectos relacionados con el rendimiento del vehículo, tales como la potencia, el consumo de combustible, ruido, estabilidad, etc., por ello se ve la necesidad de realizar un estudio en el cual se analiza cómo afecta en el vehículo viajar a varias velocidades con las ventanas en diferentes posiciones.

Viajar en el vehículo con las ventanas abiertas a velocidades inferiores a 90 km/h, con el aire acondicionado encendido consume más combustible que si se viajara a la misma velocidad y con las ventanas abiertas, pero si se viaja a velocidades mayores a los 90 km/h, conviene ir con las ventanas cerradas y el aire acondicionado encendido, ya que el consumo de combustible es menor, en comparación a lo que se consumiría por la resistencia de arrastre. [1]

La potencia adicional que requiere un motor al activar el aire acondicionado va desde 1,87 Hp hasta 5,56 Hp. [2]

El ruido que se produce al viajar en un vehículo con las ventanas abiertas se puede reducir dándoles la apertura adecuada, que incluso permite la suficiente circulación de aire para los ocupantes. [3]

Es posible obtener diversos valores de resistencia aerodinámica cuando un automóvil circula en una carretera urbana con diferentes niveles de apertura de ventanas, tanto en pruebas de túnel de viento como en simulación numérica aerodinámica. [4]

Se puede utilizar un modelo de vehículo 3D para probar el efecto de la apertura de las ventanas sobre las características de arrastre, mediante un estudio numérico. [5]

Para conocer los valores del C_x a diferentes velocidades y a varias posiciones de las ventanas, se realizan pruebas de carretera en el vehículo de estudio, luego los datos obtenidos se analizan en el *software* Minitab®.

Además, para corroborar los resultados obtenidos, se realiza un análisis en el *software* SolidWorks®, lo cual nos permite conocer de mejor manera cómo influye en el C_x la apertura de las ventanas en el vehículo.

Para desarrollar el experimento y obtener los valores óptimos de C_x , basados en las diferentes posiciones de las ventanas y diversas velocidades, se utiliza un diseño experimental de superficie de respuesta para determinar el mejor arreglo de las configuraciones con la cual se presente una mejor eficiencia aerodinámica en el vehículo.

El diseño experimental es un método a través del cual se realiza una serie de pruebas experimentales en donde los datos obtenidos se analizan estadísticamente, de modo que se pueda constatar resultados válidos y objetivos para el mejor funcionamiento del motor. [6]

Las pérdidas aerodinámicas de un vehículo cuando viaja en carretera son responsables de una gran parte del consumo de combustible y contribuyen hasta el

50 % de su consumo total a velocidades de autopista. Reducir la resistencia aerodinámica ofrece una solución económica para mejorar la eficiencia del combustible. [7]

Al disminuir la resistencia aerodinámica, consecuentemente se logra reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. [8]

El consumo de combustible al activar el aire acondicionado (A/A) tiene un incremento de entre 0,75 l/100 km y 0,83 l/100 km. [9]

2. Métodos y materiales

2.1. Equipos de muestreo

2.1.1. Vehículo de pruebas

El vehículo de turismo que se utiliza para realizar las pruebas es de marca Chevrolet modelo Forsa 1.3 que se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Vehículo de pruebas

Las características del vehículo de pruebas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del vehículo de pruebas [10]

Especificación	Detalle
Marca	Chevrolet
Modelo	Forsa 1.3 GL
Tipo	Coupe
Potencia máxima	70 Hp @ 6000 RPM
Torque	100,3 N.m @ 3500 RPM
Cilindrada	1298 cm ³
Sistema de inyección	Monopunto
Consumo de combustible	5.8 l/100 km
Distribución	SOHC
Neumáticos	155/70 R13

Las dimensiones del vehículo de pruebas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones del vehículo [10]

Especificación	Dimensión
Largo total	3745 mm
Ancho total	1590 mm
Alto total	1330 mm
Distancia entre ejes	2265 mm
Ancho de vía frontal	1365 mm
Ancho de vía posterior	1340 mm
Altura libre sobre el suelo	170 mm
Peso	808 KG

2.2. Velocímetro

Un velocímetro es un instrumento que mide la velocidad instantánea de un vehículo.

2.3. Cronómetro

Un cronómetro es un instrumento de precisión que se emplea para medir fracciones muy pequeñas de tiempo.

2.4. Resistencia al movimiento

Un vehículo circulando a velocidad constante sobre una superficie no horizontal, está sometido a los esfuerzos resistentes que se muestran a continuación. [11]

Resistencia aerodinámica al avance: F_{xa}

Resistencia a la rodadura: R_r

Resistencia gravitatoria: R_g

La resistencia total al movimiento es la que se expresa en la fórmula 1. [11]

$$R_T = R_r + F_{xa} + R_g \quad (1)$$

En la Figura 2 se observan los esfuerzos resistentes presentes en un vehículo. [11]

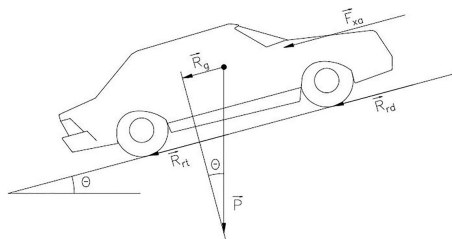


Figura 2. Esfuerzos resistentes en un vehículo. [11]

La resistencia a la rodadura se expresa en la fórmula 2. [11]

$$R_r = F_r \times P \quad (2)$$

La resistencia gravitatoria es la componente del peso en dirección paralela a la superficie de rodadura y, por tanto, se tiene la fórmula 3. [11]

$$R_g = P \times \sin \theta \quad (3)$$

La resistencia aerodinámica al avance en función de la velocidad se obtiene a través de la fórmula 4 que se muestra a continuación. [11]

$$F_{xa} = \frac{1}{2} \times \rho \times C_x \times A_f \times V^2 \quad (4)$$

Todas las fórmulas mostradas anteriormente son las que permiten calcular los valores de los coeficientes aerodinámico y de fricción.

2.5. Obtención de datos

Para obtener los diferentes valores que permitan calcular el C_x y F_r , se realizan varios ensayos con diversas velocidades del vehículo y con las ventanas en tres posiciones de apertura (0 % la ventana totalmente cerrada; 50 % la ventana abierta a la mitad y el 100 % la ventana completamente abierta), obteniendo de esta manera el tiempo en que el vehículo se desplaza sin acelerar y disminuye 10 km/h en su velocidad. En la Tabla 3 se muestran los datos obtenidos en los ensayos.

Tabla 3. Tiempo obtenido en los diferentes ensayos

Apertura [\%]	Velocidad [km/h]	t1 [s]	t2 [s]	t3 [s]
0	60 – 50	8,59	8,63	8,72
50	60 – 50	8,26	8,28	8,49
100	60 – 50	8,23	8,19	8,15
0	90 – 80	6,87	6,54	6,72
50	90 – 80	6,45	6,41	6,32
100	90 – 80	6,31	6,29	6,27
0	120 – 110	5,12	5,11	5,02
50	120 – 110	4,85	4,76	4,82
100	120 – 110	4,74	4,75	4,72

2.6. Modelado y simulación en SolidWorks®

Se realiza un modelado del vehículo en estudio que se muestra en la Figura 3 y posteriormente se efectúa una simulación en SolidWorks®, para obtener los valores de C_x , variando las aperturas de las ventanas (0 %, 50 %, 100 %); además, cabe señalar que la velocidad utilizada en las pruebas de simulación en el programa es de 120 km/h.

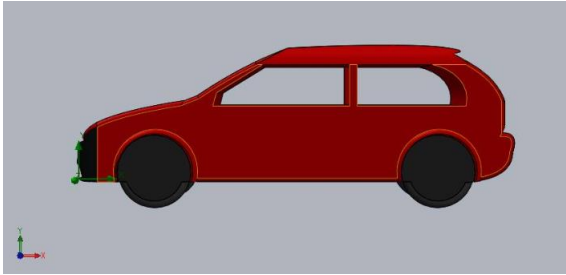


Figura 3. Modelado del vehículo de estudio.

El modelado del vehículo se realiza sobre la base de las dimensiones reales del mismo (escala 1:1), y para la simulación se consideran las condiciones geográficas de la ciudad de Cuenca, que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Consideraciones para la simulación

Especificación	Valor
Altitud de Cuenca	2550 m. s. n. m.
Presión atmosférica	74,5 KPa
Densidad del aire	0,957 kg/m ³
Velocidad promedio	120 km/h
Área frontal del vehículo	1,71 m ²
Peso	808 kg

3. Resultados y discusión

3.1. Cálculo de C_x y F_r

De acuerdo con los datos obtenidos y mediante la resolución de los sistemas de ecuaciones lineales, se puede calcular los valores de C_x y F_r para las diferentes velocidades del vehículo y las ventanas en las tres posiciones. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5. Obtención de valores de C_x y F_r

Apertura [%]	Velocidad [km/h]	C_x	F_r
0	60 – 50	0,3428	0,0190
50	60 – 50	0,3517	0,0190
100	60 – 50	0,3589	0,0190
0	90 – 80	0,3422	0,0215
50	90 – 80	0,3662	0,0215
100	90 – 80	0,3709	0,0215
0	120 – 110	0,3421	0,0243
50	120 – 110	0,3676	0,0243
100	120 – 110	0,3723	0,0243

3.2. Resultados de la simulación

En la Figura 4 se muestra el modelado del vehículo de estudio, con un análisis aerodinámico, en este caso las

ventanas están totalmente cerradas (0 % de apertura) y se puede observar que el aire fluye alrededor del vehículo sin ingresar al mismo.

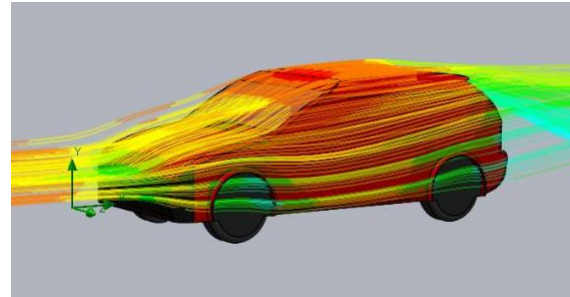


Figura 4. Análisis aerodinámico con las ventanas cerradas.

Cuando las ventanas se abren un 50 %, el aire ingresa en cierta parte al habitáculo del vehículo, como se observa en la Figura 5, influyendo en un porcentaje de variación del C_x .

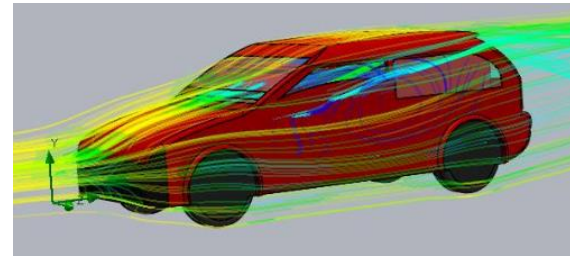


Figura 5. Análisis aerodinámico con 50 % de apertura de las ventanas.

Con un 100 % de apertura de las ventanas se puede observar en la Figura 6 como ingresa el aire al vehículo, afectando considerablemente al C_x .

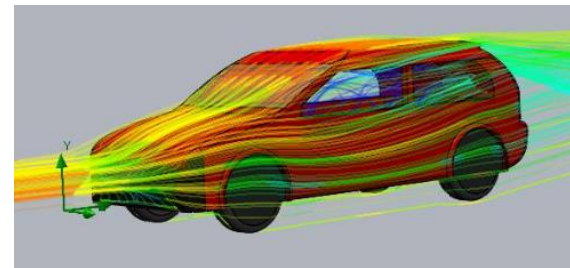


Figura 6. Análisis aerodinámico con 100 % de apertura de las ventanas.

En la Tabla 6 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la simulación realizada en Solid-Works®, con las diferentes posiciones de apertura de las ventanas del vehículo y a la velocidad de 120 km/h.

Tabla 6. Resultados de la simulación en SolidWorks®

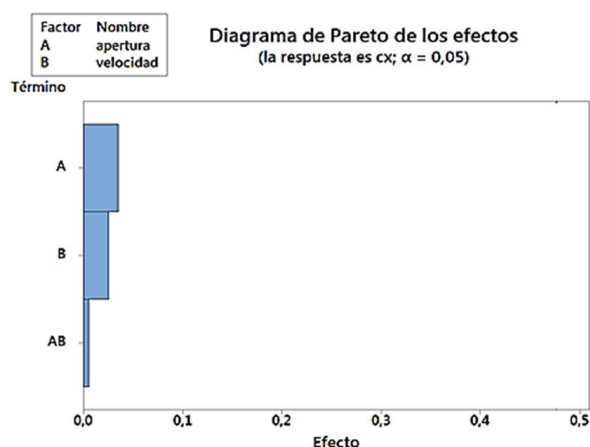
Apertura [%]	Velocidad [km/h]	C _x
0	120	0,293
50	120	0,307
100	120	0,318

Como se puede observar, los valores de C_x que se obtienen en la simulación realizada tienen buena concordancia con los resultados obtenidos en función de la solución de ecuaciones basadas en los datos adquiridos en las pruebas de carretera.

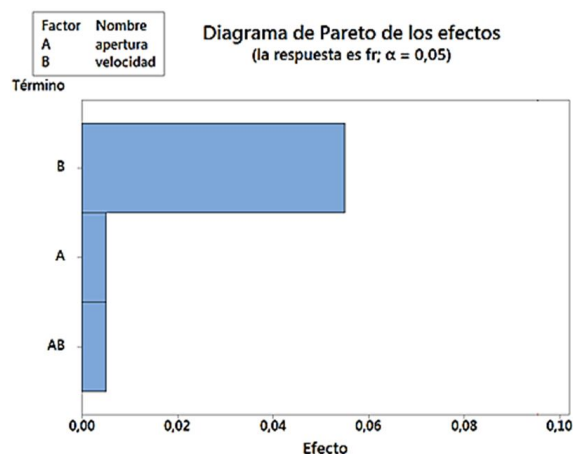
3.3. Análisis experimental

Se realiza un análisis experimental mediante un diseño experimental factorial de dos niveles para determinar la influencia de la apertura de las ventanas y la velocidad del vehículo como variables de entrada sobre el C_x y F_r como variables de salida. Luego de ello se realiza un diseño experimental de superficie de respuesta para optimizar los valores de C_x y F_r .

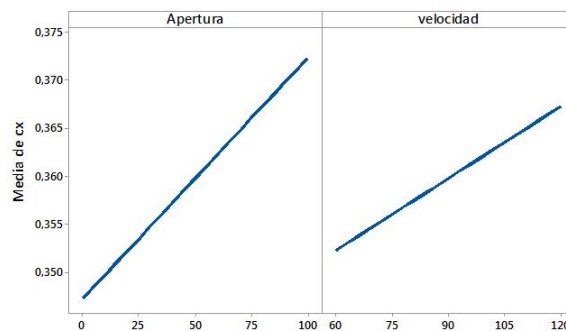
Según el diagrama de Pareto mostrado en la Figura 7, existen dos efectos significativos, de los cuales se puede observar que el efecto más grande es la apertura de las ventanas del vehículo (A), con lo cual varía el valor de C_x , influyendo así en el consumo de combustible y por consiguiente la reducción de emisiones contaminantes. El efecto de interacción entre las variables (AB) es muy pequeño y no influye en la variación del C_x .


Figura 7. Diagrama de Pareto con el efecto C_x

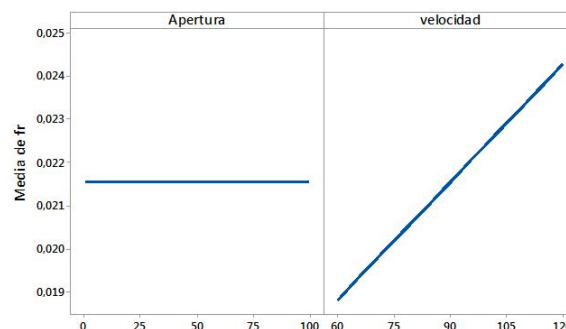
Como se observa en el diagrama de Pareto ilustrado en la Figura 8, el efecto más grande es la velocidad del vehículo (B), con lo cual varía el F_r , que influye en la adherencia de los neumáticos a la calzada.


Figura 8. Diagrama de Pareto con el efecto F_r .

La posición de las ventanas en diversos niveles influye en los valores de C_x , así como también lo hace la velocidad tal como se muestra en la Figura 9, por lo que se puede definir que el C_x tiene cierta dependencia de la apertura de las ventanas y de la velocidad del vehículo.


Figura 9. C_x en función de la apertura de las ventanas y la velocidad del vehículo.

El F_r no varía con la posición de apertura de las ventanas, pero sí depende de la velocidad del vehículo como se puede observar en la Figura 10.


Figura 10. F_r en función de la apertura de las ventanas y la velocidad del vehículo.

El C_x aumenta su valor conforme se abren las ventanas y se va aumentando la velocidad del vehículo,

como se indica en la Figura 11, por lo tanto, se define que el valor óptimo de C_X es de 0,36. Este valor permite obtener ahorro de combustible y reducir las emisiones contaminantes.

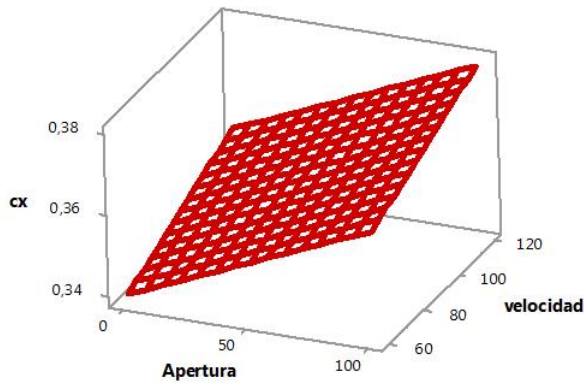


Figura 11. Variación del C_X a diferentes velocidades y apertura de las ventanas.

Cuanta más alta sea la velocidad del vehículo, el F_r va a tener un mayor valor, tal como se muestra en la Figura 12; además, se observa que la apertura de las ventanas no influye en el valor de F_r , y se determina que su valor óptimo es de 0,22; esto indica que el vehículo tendrá buena adherencia a la calzada.

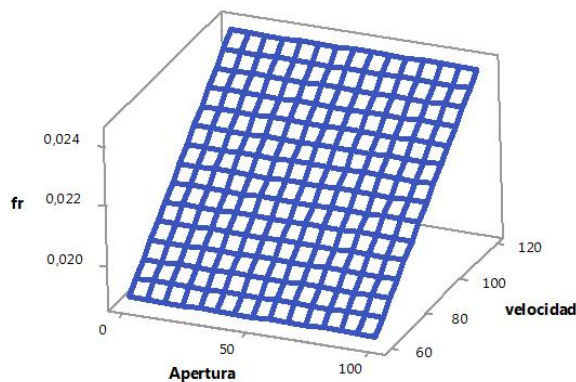


Figura 12. Variación de F_r a diferentes velocidades y apertura de las ventanas.

Para obtener valores bajos de C_X , conviene viajar en las condiciones que muestra la franja blanca de la Figura 13, donde se puede identificar que cuando se desee ir a velocidades superiores a los 90 km/h, conviene ir con las ventanas parcial o completamente cerradas y para velocidades inferiores a los 90 km/h, no interesa si se viaja con las ventanas abiertas o cerradas ya que la influencia en el C_X es mínimo.

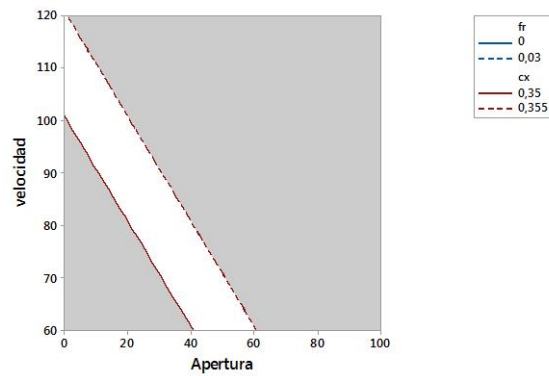


Figura 13. Zona de optimización del C_X .

En función del estudio y análisis realizado se determina que para viajar a velocidades inferiores a los 90 km/h conviene abrir las ventanas del vehículo y apagar el aire acondicionado (A/A), ya que no existe una variación significativa en el valor de C_X ; en cambio, para velocidades superiores a los 90 km/h es mejor cerrar las ventanas y encender el aire acondicionado, ya que el valor de C_X sufre una variación lo cual representa mayor consumo de combustible y por ende un incremento en las emisiones contaminantes.

En la Tabla 7 se muestra la velocidad a la cual se debería abrir o cerrar las ventanas del vehículo y a su vez encender o apagar el A/A.

Tabla 7. Velocidades a las que se debería abrir las ventanas del vehículo o encender el A/A

Velocidad [km/h]	Posición de ventanas	A/A
< 90	Totalmente abiertas	Apagado
> 90	Totalmente cerradas	Encendido

Circular con las ventanas abiertas a velocidades inferiores a los 90 km/h y con el aire acondicionado apagado, representa una disminución en el consumo de combustible, lo cual significa una reducción de emisiones contaminantes.

4. Conclusiones

Los valores de C_X fueron obtenidos a raíz de los datos que nos brindaron las pruebas realizadas en carretera con las ventanas en diferentes posiciones de apertura y a distintas velocidades del vehículo, lo cual tiene gran similitud con los valores obtenidos en la simulación realizada en SolidWorks®.

Los resultados nos muestran que el C_X tiene poca variación cuando la velocidad es inferior a 90 km/h, sin importar la posición de las ventanas; en cambio, para velocidades mayores a 90 km/h, el valor del C_X sufre un incremento considerable, lo cual representa una mayor resistencia al avance del vehículo y por ende que

exista mayor consumo de combustible e incremento en las emisiones contaminantes.

Para velocidades superiores a los 90 km/h, se debería considerar cerrar las ventanas y encender el aire acondicionado, pero para velocidades inferiores a los 90 km/h, es mejor abrir las ventanas y apagar el aire acondicionado.

Referencias

- [1] Y. Zhang, J. Li, and Z. Zhang, "Analysis on car aerodynamic drag for open windows," *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, no. 6, pp. 651–655, 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/oKvEFM>
- [2] K. Shete, "Influence of automotive air conditioning load on fuel economy of ic engine vehicles," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, pp. 1367–1372, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/5g6QWj>
- [3] F. Chen and P. Qian, "Vehicle wind buffeting noise reduction via window openings optimization," in *SAE Technical Paper*. SAE International, 04 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4271/2008-01-0678>
- [4] Z. Ying-Chao, Z. Jing, L. Jie, and Z. Zhe, "Wind tunnel tests and aerodynamic numerical simulations of car opening windows," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 58, no. 1, pp. 62–78, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1504/IJVD.2012.045923>
- [5] M. Jaffar, M. Kashif, I. Sultan, and A. O. Ashraf, "Study on the effect of window opening on the drag characteristics of a car," *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, vol. 9, no. 3/4, pp. 311–320, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1504/IJVSMT.2014.066502>
- [6] H. Gutiérrez and R. de la Vara, *Análisis y dise no de experimentos*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/1HgJWF>
- [7] M. N. Sudin, M. A. Abdullaha, S. A. Shamsuddin, F. R. Ramli, and M. T. Musthafah, "Review of research on vehicles aerodynamic drag reduction methods," *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, vol. 14, no. 02, pp. 37–47, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/TAUyJz>
- [8] K. D. Abdollah and M. S. Z. Y. Ali, "Green nature and reducing of air pollution with vehicle drag coefficient correction," *Advances in Energy Engineering (AEE)*, vol. 1, no. 2, pp. 28–33, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/Bq2wYd>
- [9] M. A. Acosta and W. P. Tello, "Estudio del aire acondicionado en el consumo de combustible, potencia del motor y confort térmico en la cabina de un vehículo liviano," Quito, 2016.
- [10] Suzuki, *Manual del propietario*, Hamamatsu, 1991.
- [11] F. Aparicio, C. Vera, and D. Vicente, "Teoría de los vehículos automóviles," Madrid, 1995.